

模型風車実験用の簡易で安価な小型風洞装置の製作と特性計測

原 豊・吉見 浩一・田中 裕之^{*1}
 秋山 雅彦^{*2}・石渕 信孝^{*2}・野波 将宏^{*2}・河村 直樹^{*2}
 鳥取大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻
^{*1}鳥取大学工学部応用数理工学科
^{*2}鳥取大学ものづくり教育実践センター

Manufacture and Performance Measurements of a Simple and Low-Cost Small Wind Tunnel for Model Experiments of Wind Turbines

Yutaka HARA, Kouichi YOSHIMI, Hiroyuki TANAKA^{*1}, Masahiko AKIYAMA^{*2},
 Nobutaka ISHIBUCHI^{*2}, Masahiro NONAMI^{*2} and Naoki KAWAMURA^{*2}
 Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering
 Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
 E-mail:hara@damp.tottori-u.ac.jp

^{*1} Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering, Tottori University

^{*2} Innovation Center for Engineering Education, Tottori University

Abstract: With the aim of doing the performance comparison experiments of small models of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), a simple and low-cost small wind tunnel without a contraction nozzle has been constructed. This wind tunnel is simply composed of an axial blower, a wide-angle diffuser, and a flow conditioner part which includes an aluminum-honeycomb and three stainless steel screens. The total length of the wind tunnel is 2.6 m and the outlet is a square of 0.8 m×0.8 m. The maximum wind speed measured at the center of the outlet is 4.7 m/s. The uniformity of wind speed distribution is 4.7 % (RMS / mean speed) and the mean turbulence intensity is 4.4 %, in the core region (- 0.3 m ≤ Y or Z ≤ 0.3 m) at the outlet (X = 0.01 m). The total cost of the wind tunnel was about 630,000 JPY (about 8,000 USD).

Key Words: Wind tunnel, Small wind turbine, Low cost, Performance measurement, Renewable energy

1. はじめに

地球温暖化対策、今後徐々に減少していくことが予想される化石燃料の代替エネルギーの開発、そして本年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原発事故を契機としてクローズアップされたエネルギーの安全性と安定した供給についての問題から、現在、再生可能エネルギーが注目されている。再生可能エネルギーの導入で上記のエネルギーに関する問題の多くが解決されることはあり得なく、既存の火力や原子力を置き換えるほど膨大な量の再生可能エネルギーが今後導入されると予想することも現実的ではない。しかし、これまで以上に再生可能エネルギーの利用促進をしていく必要性が高まっており、これが一時のブームではなく、大きな流れとなって人類社会が進んで行くべき方向であることは疑いないと思われる。大型の風力発電や太陽光発電は実用化・普及が進んでおり、現在の再生可能エネルギーへの注

目の中で最も現実的な技術分野となっているが、一方、小型風力発電については、高い導入コスト、騒音の発生、低い効率、等々の問題があり、普及するには至っていない。しかし、風のエネルギーは普遍的に存在しており、小型風力発電機は比較的導入しやすいエネルギー源である。場所や用途によっては、他のエネルギー源よりも有効になる場合もあり、補完的役割を担う可能性もあり得る。鳥取大学工学部では、約10年前より風力発電の研究に取り組んでおり、本稿の著者の一人も小型風車の風洞実験などを行ってきた[1]–[4]。最近、小型風車の低コスト化を目標にして、低重心風車と称したテーパ翼を特徴とする小型垂直軸風車を提案した[5]–[7]。現在、その基本特性を明らかにし、最適な形状の低重心風車の開発を目的として、光造形法で製作した模型風車の特性実験を計画している。

通常、流体機械の精密な流体実験を行う場合、流速分布が一様であり、乱れ強度も小さく制御さ

れた風洞装置を必要とする．流れ速度の一様性と乱れ強度の減衰を実現するためには，収縮ノズルを必要とするが，測定対象のモデル(模型)の大きさに対して，その何倍もの大きさの整流部断面積を必要とする．

本研究で実験対象とする模型風車は，その翼断面が連続的に変化する複雑な3次元形状を有しており，光造形法(材質：エポキシ樹脂)によって製作を行っている[7]．また，その大きさは，模型製作の精度と実機(直径2～3 m程度を想定)の回転状態と大きな隔たりのないことを考慮して，ロータ直径を0.6 mに設定している．この大きさの模型実験の場合，本学に設置している大型風洞(吹出口：1.5 m×1.5 m，整流部サイズ：3.4 m×3.4 m)程度の大きさの風洞が本来使用に適している[8]．しかし，現在その他の研究テーマ(垂直軸風車の後流計測[4])で継続して使用していること，本実験で用いる模型風車が繊維補強の無い樹脂でできているため，万が一の破損などから実験者の身の安全を守るために模型風車の周囲を金網などで囲いをして実験を行う必要があることなどから，大型風洞の使用はせず，屋内の実験室において実験装置を構築することにした[7]．本研究では，本来乱れの大きい自然風の中で動作する風車の実験であるため風車周りの流れ場の詳細な計測を行うことが目的ではなく，風車形状の違いによる性能の差を実験的に明らかにすることに主眼を置いている．従って乱れ強度を小さくすることよりも流れ場の一様性に重点を置く．風車の特性計測(相対的比較)を行う目的では，一定風速状態において回転数を徐々に段階的に増加して，周速比(翼の回転周速度／主流風速)を変えた回転状態でトルク計測を

繰り返し行い，風車トルクの最大値を超え，再びトルクがゼロに近づく状態まで計測ができれば十分であり，風速をそれほど大きくする必要は無い．風速が速い場合には，高い回転数まで上げる必要があり，実験的困難が出てくることにもなる．さらに，実験スペースが限られていることと研究予算規模が小さいことなどを勘案して，本研究では吹出口を大きくするため収縮ノズルを設けず，整流金網の枚数なども最小限に抑えて，できるだけ全長は短くした簡易で安価な小型風車実験用の風洞装置を製作することにした．製作した小型風洞の概要とその性能計測結果をまとめ，今後の小型風車研究の基礎資料とすることを目的として本稿を記す．

2. 製作した小型風洞の概要

2. 1 送風機

図1に本研究で使用した軸流送風機の外観を示す．また，表1に送風機的主要仕様を示す．本送風機の名称は低騒音形ジェットGYMであり，出力が0.75 kWと小さいにも関わらず，比較的大きな風量(350 m³/min, 60 Hz)を発生する汎用の送風機である．図1では，送風機前面にガードネットが取り付けられているが，本研究ではこれを取り外し，後述する広角度ディフューザに送風機を直接接続する．なお，本送風機の以前のタイプ(GR-604)では，ハブの部分が目隠し状になっており，送風機吹出後の中央部に明確な低速領域が発生する構造となっていた．図1に示すGRL-6361では，ハブ前面の目隠し状の覆いは無くなっており，ハブ自



図1 送風機(株鎌倉製作所, GRL-6361)

表1 送風機的主要仕様

型式	GRL-6361
ファン径(φ mm)	626
吹出口径(φ mm)	540
動翼数	9
静翼数	11
風量(m ³ /min)	290(50Hz) / 350(60Hz)
最大風速(m/s)	10.3(50Hz) / 13.2(60Hz)
電源	3φ, 200/220V
出力(kW)	0.75
極数(P)	6
質量(kg)	65
騒音Aレンジ(dB)	71(50Hz) / 76(60Hz)
製造元	株式会社 鎌倉製作所

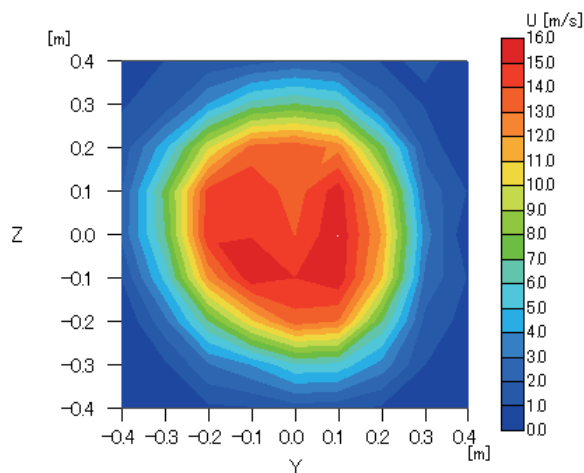


図2 送風機から下流 1m における速度分布

身は丸みを帯びたお椀形となっている。ハブ下流における低速領域の発生を抑え、流れ場の一様性を良好なものにするためには、ハブは流線形として、その全長を直径の3倍以上にすべきことが、

低乱流風洞の設計上は推奨されているが[9], 本研究では前述の目的から、完成した風洞装置において特に問題となる流れ場の非一様性が観測されない限り、送風機のハブ部分には変更を加えないことにした。本研究では、風速の調節が任意にできるように送風機をインバータ制御することにした。使用したインバータは、三菱電機製の汎用インバータ・FR-D720-1.5K である。最大周波数は定格の 60Hz に制限をし、それ以下の周波数を任意に設定することで、風速を可変とした。図2に周波数を 60Hz とした場合における、送風機出口から下流 1m の位置で計測した噴流軸方向(X 軸)の風速 U 成分の分布を示す。計測はピトー管を用いた。図2の分布を見ると噴流はそれほど広がってはなく、中央部において風速の非一様性が見られる。この場合の中央部を座標(Y, Z)において $|Y| \leq 0.2 \text{ m}$, $|Z| \leq 0.2 \text{ m}$ の範囲と定義した場合、この中央部における最大風速は 15.8 m/s, 最小風速は、7.0 m/s であり、平均風速は 12.8 m/s であった。本小型風洞製作の目標は、この風速分布を全長 2 m 程

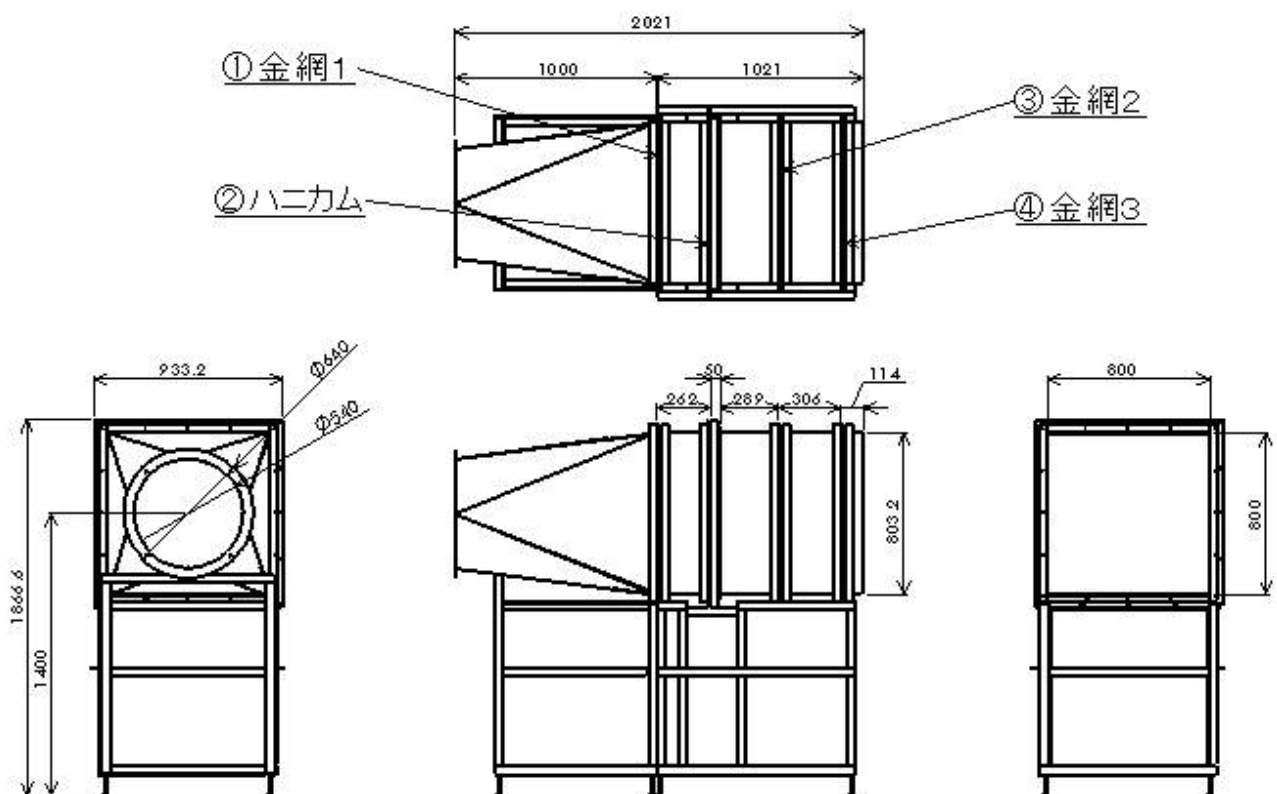


図3 製作した高角度ディフューザと整流装置



図4 小型風洞の外観

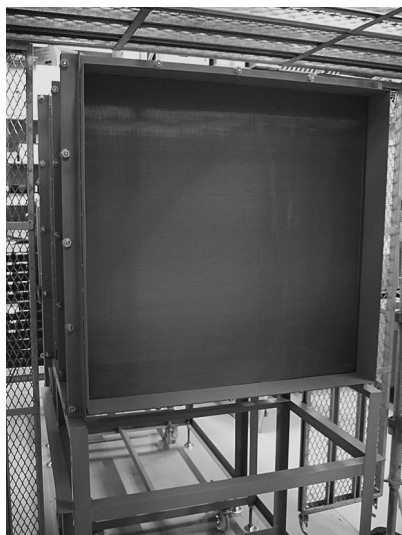


図5 風洞吹出口

度の距離において、拡大と整流を行い、直径 0.6 m の風車模型が収まる範囲において、平均風速 5 m/s 以上、風速の一樣性は平均風速値からの偏差の二乗平均平方根(RMS 値)が 0.3 m/s 程度(平均風速に対する RMS 値の割合で 6 %程度)、乱れ強度については 5 %程度を実現することである。

2. 2 高角度ディフューザと整流装置

図3に本研究で製作した高角度ディフューザと整流装置の模式図および主要な寸法を示す。また、完成した小型風洞の全体写真を図4に、吹出口の写真を図5に示す。送風機を含めた風洞装置の全長は約 2.6 m である。なお、風洞吹出口から 1 m

表2 ハニカムと整流金網の仕様

名 称	項 目	値 等
ハニカム	外形寸法	840 L × 840 W × 50 T
	材質	アルミニウム合金 (A5052)
	セルサイズ	6.35 mm (1/4 in)
金網 1, 2	織り方	平織
	材質	ステンレス (SUS304)
	メッシュ	20
	線径	0.29 mm
	開孔率: β	0.5954
	外枠寸法	850 × 850
金網 3	有効部分	810 × 810
	織り方	平織
	材質	ステンレス (SUS304)
	メッシュ	40
	線径	0.14 mm
	開孔率: β	0.6077
	外枠寸法	850 × 850
	有効部分	810 × 810

下流に測定対象となる小型垂直軸風車の模型を設置することとし、図4と図5の写真の一部に見えているように、小型風車の回転実験を行う場合の安全対策として、建築用足場と金網で測定部を囲ってある。

本小型風洞は吹出型であり、送風機の円形吹出口(直径 ϕ 0.54 m)を 0.8 m × 0.8 m の正方形断面に広角度ディフューザで拡大している。この場合の面積比 A は 2.79 となるが、文献[9]あるいは[10]を参照し、広角度ディフューザにおける金網枚数が 0 の場合に、はく離が起きないとされている安全側になるように頂角 2θ を選定し、本広角度ディフューザでは $2\theta = 15^\circ$ とした。この結果、広角度ディフューザの流路方向長さは 1 m となった。

整流装置は、本研究では、実験スペースの制限から流路方向長さを 1 m 程度にし、図3に示す位置に、ハニカム 1 枚と 3 枚の金網を挿入することにした。ハニカムはセルサイズが 1/4 インチ(6.35 mm)のアルミ・ハニカムとし、その流路方向長さは、50 mm とした。金網は開孔率 $\beta > 0.57$ を満たすステンレス製平織金網とし[9]、目の粗い金網と目の細かい金網の 2 種類を使用した。目の粗い 20 メッシュ(線径 0.29 mm, $\beta = 0.5954$)の金網はハニカムの前後に約 250 ~ 300 mm の間隔を置いて設置した。目の細かい 40 メッシュ(線径 0.14 mm, $\beta = 0.6077$)の金網は最終金網として風洞吹出口から 114 mm 上流に設置した。表2にハニカムと整流金網の仕様をまとめる。なお、ハニカムの上流側に挿入した金網 1 のみは、補強のため ϕ 4 mm のステンレス棒を金網の縦横の中心位置に十文字状に入

れてある．ハニカムと整流金網の製造元は、いずれも昭和飛行機工業㈱である．

3. 風洞の性能計測結果

図6に風洞吹出口の直後($X = 0.01$ m, X は流路方向の座標, X 座標の原点は吹出口の中心と定義)の吹出口中央($Y = Z = 0$)においてピトー管で計測した平均風速のインバータ周波数依存性を示す．計測は5回行い、その平均風速をプロットしてある．図6の直線は実験値を最小二乗法で直線近似した結果であり、風洞中心の平均風速(U 成分)は、インバータの周波数にほぼ比例して変化していることがわかる．ただし、定格 60 Hz における平均風速は、約 4.7 m/s であり、目標とした 5 m/s を若干下回る結果となった．

図7に風洞吹出口の直後の断面内($X = 0.01$ m, $|Y| \leq 0.5$ m, $|Z| \leq 0.5$ m)における風速分布(U 成分)を示す．インバータ周波数を 60Hz とした場合である．計測はピトー管を用いており、計測ポイントは Y, Z の各座標軸方向に 0.05 m 間隔とした．図7の中央部分を $|Y| \leq 0.3$ m, $|Z| \leq 0.3$ m の領域と定義した場合、この中央部における平均風速は 4.57 m/s であり、最大値は 4.91 m/s, 最小値は 4.04 m/s である．平均値からの偏差の RMS 値は 0.22 m/s であり、速度場の一様性を RMS / 平均値 $\times 100(\%)$ で表すならば、4.7 % になる．

図8は、図7と同様にして計測した風洞吹出口下流 $X = 1$ m の位置における速度 U 成分の分布で

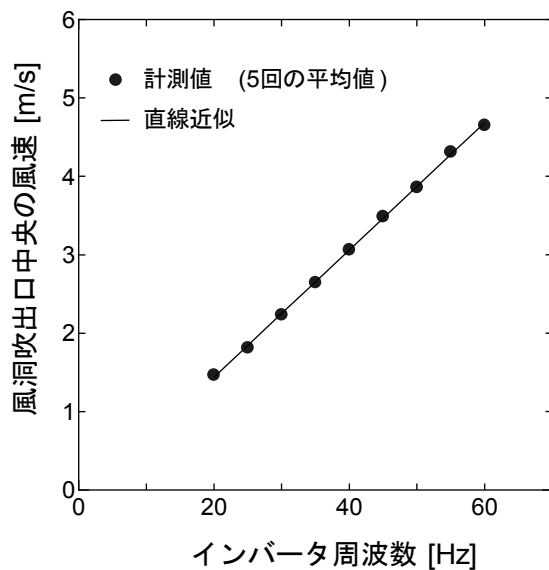


図6 インバータ周波数と風速の関係

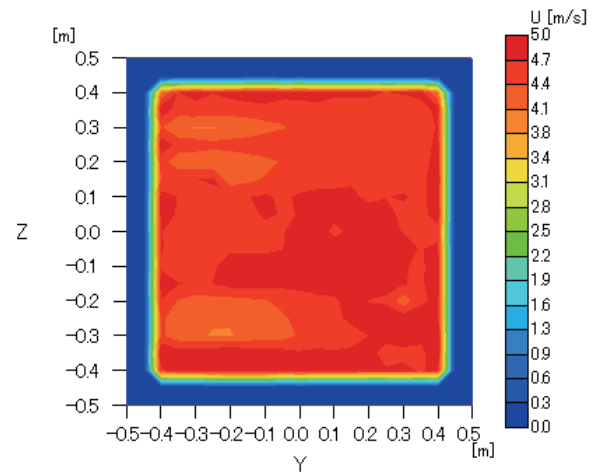


図7 吹出口直後($X = 0.01$ m)の風速分布

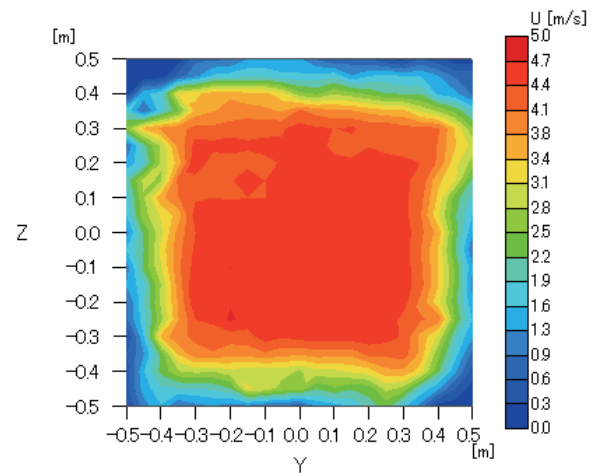


図8 吹出口の下流($X = 1$ m)の風速分布

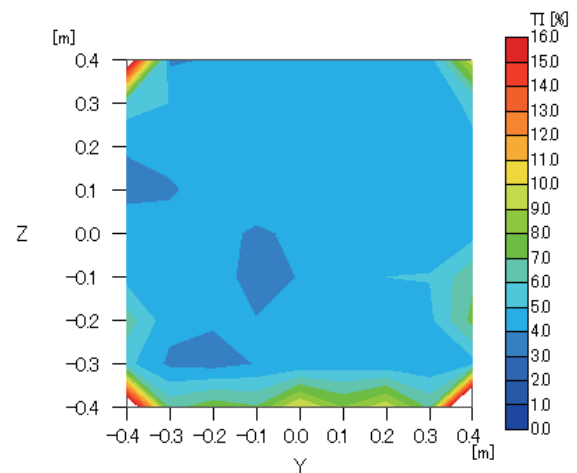


図9 吹出口直後($X = 0.01$ m)の乱れ強度分布

ある．この中央部($|Y| \leq 0.3 \text{ m}$, $|Z| \leq 0.3 \text{ m}$)の平均風速は 4.50 m/s であり，中央部における最大値は 4.74 m/s ，最小値は 4.11 m/s であった．中央部平均値からの偏差の RMS 値は 0.14 m/s であり，一様性は 3.1% と見積もられる．ここで定義した噴流中央部領域に関する限り，吹出口直後よりも下流方向に 1 m 離れた位置の方が風速分布の一様性は増加する結果となった．

図 9 は風洞吹出口の直後の断面内($X = 0.01 \text{ m}$, $|Y| \leq 0.4 \text{ m}$, $|Z| \leq 0.4 \text{ m}$)における速度 U 成分の乱れ強度分布の計測結果である．計測は I 型熱線プローブを使用した熱線流速計で行った．計測ポイントは Y, Z の各座標軸方向に 0.1 m 間隔であり，各ポイントにおいて， 10 kHz のサンプリング周波数で $30,000$ 点の速度データをサンプリングし，乱れ強度(TI)を算出した．図 9 の中央部($|Y| \leq 0.3 \text{ m}$, $|Z| \leq 0.3 \text{ m}$)における乱れ強度の平均値は 4.4% であった．因みに最終段の整流金網 3 を取り外した場合には，吹出口直後の噴流中心部において平均風速は約 5.0 m/s と多少増加するが，乱れ強度は金網 3 がある場合に対して倍増し 8.8% になる．このことから，最終段の目の細かい整流金網 3 が流れ場の一様性と乱れ強度の抑制において効果が大きいことがわかる．

4. まとめ

本研究では，限られたスペースと予算の中で，小型風力発電機の模型実験を可能とする簡易で安価な小型風洞を設計・製作し，その基本特性を計測した．当初の目標は最大平均風速 5 m/s であったが，完成した風洞装置の最大平均風速は，それを若干下回る結果となった(最大約 4.7 m/s)．しかし，最大風速以外の一様性や乱れ強度については，当初の目標をほぼ満足する性能が得られていると言える．なお，送風機，インバータ，高角度ディフューザおよび整流装置部(ハニカム，金網を含む)の購入および製造経費の総額は約 63 万円である．今後は，小型風車の模型実験に，本小型風洞装置を活用して行く予定である．

謝辞

本研究は平成 23 年度科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金(基盤研究(C)))として採択された研究課題「低重心風車の最適ローター構造の探索研究」(23561031)に基づくものである．ここに明記し謝意を表します．

参考文献

- [1] 原 豊，林 農，松岡稔昌，梶原正敏：住環境に適する低回転高トルク型水平軸風車に関する研究，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 34, pp. 99-106, 2003.
- [2] Hayashi, T., Li, Y., Hara, Y.: Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor, JSME International Journal, Series B, Vol. 48, No. 1, pp.9-16, 2005.
- [3] Hara, Y., Hara, K., Hayashi, T.: Moment-of-Inertia Dependence of Vertical Axis Wind Turbine in Pulsating Winds, Renewable Energy 2010 Abstracts, O-Wd-7-1, 2010.
- [4] Hara, Y., Suzuki, T., Ochiai, Y., Hayashi, T.: Velocity Field Measurements in Wake of a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, ACT CITY Congress Center, Hamamatsu, Japan, AJK2011-07002(USB), pp.24-29, 2011.
- [5] Hara, Y.: A Study on Low Center-of-Gravity Wind Turbine for Built Environment, 13th International Conference on Wind Engineering (ICWE13), Amsterdam, The Netherlands, Paper-No.096 (USB), 2011.
- [6] 原 豊：低重心垂直軸風車の提案と翼素運動量理論による特性予測，風力エネルギー(日本風力エネルギー学会誌，論文)，通巻 98, pp. 134-139, 2011.
- [7] 原 豊，吉見浩一，江見孝典：低重心垂直軸風車の回転実験，日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集，No. 11-1 (CD-ROM)，S051021, 2011.
- [8] 林 農，原 豊，康 仁勝，加藤 優，藤本裕己，若 良二，田川公太朗，神近牧男：沙漠環境風洞の特性計測(定常風と脈動風)，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 37, pp. 89-106, 2007.
- [9] 伊藤英覚，小林陵二：低乱風洞の設計と性能，日本機械学会誌，Vol. 89, No. 808, pp. 248-254, 1986.
- [10] Barlow, J. B., Rae, W. H. Jr., Pope, A.: Low-Speed Wind Tunnel Testing (3rd. ed.), p.89, JOHN WILEY & SONS, INC., 1999.

(受理 平成 23 年 10 月 31 日)